



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Effektivisering af forbelastning ved anvendelse af vertikaldræn

Jensen, B.S. ; Sørensen, Carsten Steen

*Publication date:*  
2000

*Document Version*  
Tidlig version også kaldet pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Jensen, B. S., & Sørensen, C. S. (2000). *Effektivisering af forbelastning ved anvendelse af vertikaldræn*. Geotechnical Engineering Group. AAU Geotechnical Engineering Papers : Foundation Engineering Paper Bind R 2005 Nr. 17

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# **Effektivisering af forbelastning ved anvendelse af vertikaldræn**

**B.S. Jensen, C.S. Sørensen**

**June 2000**

**Foundation Engineering Paper No 17**



**GEOTECHNICAL ENGINEERING GROUP  
AALBORG UNIVERSITY DENMARK**

**Jensen, B.S., Sørensen, C.S. (2000). Effektivisering af forbelastning ved anvendelse af vertikaldræn.**

*AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R2005.

*Foundation Engineering Paper No 17*

The paper has been accepted for publication in *Proc. Nordic Geotechnical Meeting NGM-2000, Helsinki, June 5-7.2000.*

© 2000 AAU Geotechnical Engineering Group.

Except for fair copying, no part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the Geotechnical Engineering Group.

Papers or other contributions in AAU Geotechnical Engineering Papers and the statements made or opinions expressed therein are published on the understanding that the author of the contribution is solely responsible for the opinions expressed in it and that its publication does not necessarily imply that such statements or opinions are or reflect the views of the AAU Geotechnical Engineering Group.

The AAU Geotechnical Engineering Papers - AGEp - are issued for early dissemination and book keeping of research results from the Geotechnical Engineering Group at Aalborg University (Department of Civil Engineering). Moreover, the papers accommodate proliferation and documentation of field and laboratory test series not directly suited for publication in journals or proceedings.

The papers are numbered ISSN 1398-6465 R<two digit year code><two digit consecutive number>. For internal purposes the papers are, further, submitted with coloured covers in the following series:

Series	Colour
Laboratory testing papers	sand
Field testing papers	grey
Manuals & guides	red
Soil Mechanics papers	blue
Foundation Engineering papers	green
Engineering Geology papers	yellow
Environmental Engineering papers	brown

In general the AGEp papers are submitted to journals, conferences or scientific meetings and hence, whenever possible, reference should be given to the final publication (journal, proceeding etc.) and not to the AGEp paper.

# Effektivisering af forbelastning ved anvendelse af vertikaldræn

Betty Stenstrup Jensen

COWI, Rådgivende Ingeniører A/S, Århus

Carsten S. Sørensen

COWI, Rådgivende Ingeniører A/S, Aalborg

GEOTEKNIKGRUPPEN, Aalborg Universitet, Danmark

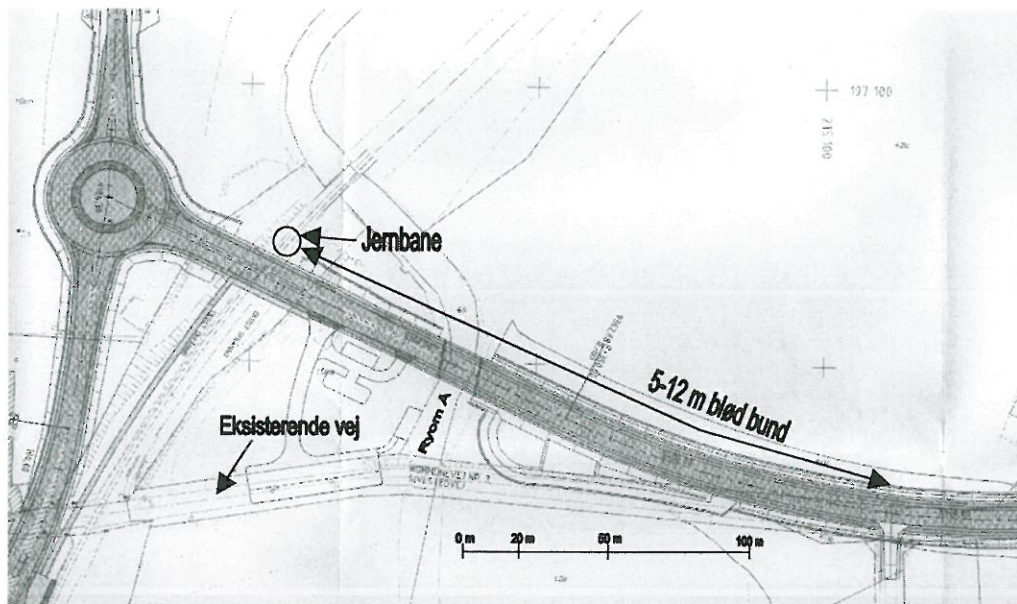
**SYNOPSIS:** Over en strækning på 500 m skal der etableres en ny vej. Vejen skal krydse en jernbane i niveau, en å, et blødbunds område med op til 12 m blød bund, for til sidst at blive sluttet på den eksisterende vej. For at sikre, at der ikke udvikles uacceptable differenssætninger mellem de enkelte delelementer af vejen, udføres vejen ved forbelastning. Sætninger fra traditionel konsolidering af forbelastningen vil tage 30 år. Da denne periode skal reduceres til 20 måneder, vælges at etablere vertikal dræn gennem forbelastningsdæmningen. Herved reduceres drænvejen fra 6,0 m til 0,5 m og drænretningen ændres fra at være overvejende lodret ved en traditionel konsolidering til at være overvejende vandret. Dette bevirker, at dræntiden reduceres væsentligt, idet casen viser, at forholdet mellem permeabiliteten i vandret retning,  $k_x$  og i lodret retning,  $k_y$  er 30 for den aktuelle gytje.

## 1 INDLEDNING

I forbindelse med etablering af en forlægning af landevej 534, Kalø-Kolind på Djursland (figur 1) skal en strækning på ca. 500 m af vejen krydse en eksisterende jernbane i niveau, krydse Ryom Å og et større blødbundsområde for til sidst at blive sluttet på en eksisterende forbelastede landevej.



Figur 1. Forlægning af landevej 534, Kalø-Kolind på Djursland

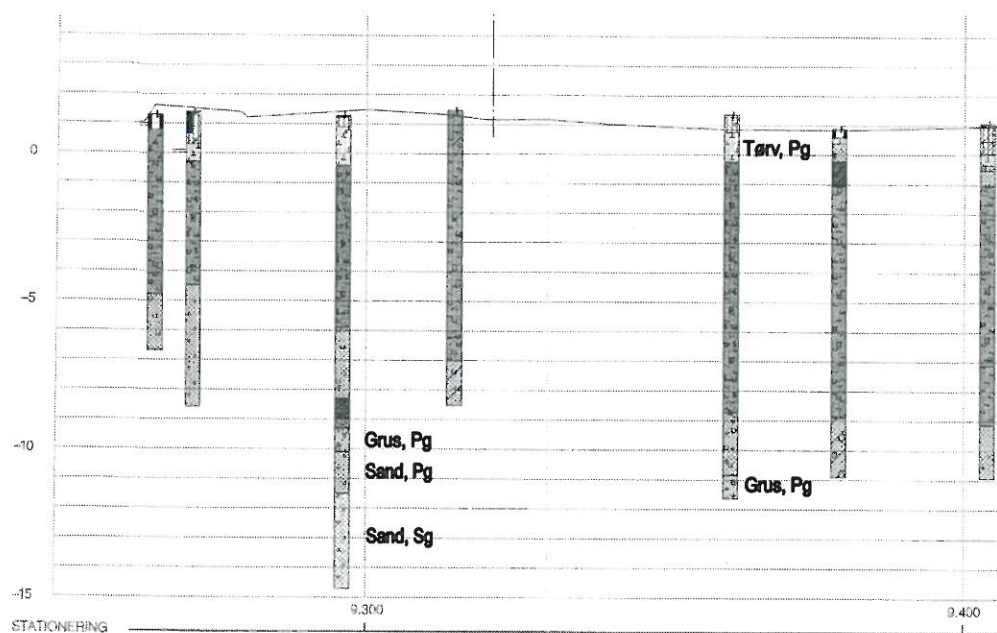


Figur 2. Situationsplan for delstrækning på 500 m.

Ved etableringen af vejen skal det eksisterende terræn hæves 0,5 á 2,4 m. Vejmyndigheden Århus Amt ønsker vejen anlagt, således at de fremtidige differenssætninger i vejen bliver acceptable, og at vejen kan etableres indenfor en periode på 20 måneder.

## 2 GEOTEKNISKE FORHOLD

Geotekniske borer for vejen viser, at jordbundsforholdene i området øverst består af recent muld og sandfyld, herunder postglacialt gytje med en lagtykkelse varierende mellem 4 og 12 m. Under den postglaciale gytje er der postglacialt sand. Et udsnit af længdeprofilen for området er vist i figur 3.



Figur 3. Udsnit af længdeprofil for området

Styrke- og deformationsparametrene for gytjen blev fastlagt på grundlag af vingeforsøg udført i borerne, samt konsoliderings- og triaksialforsøg udført på intakte jordprøver udtaget i de geotekniske borer.

Tabel 1. Rumvægte og styrkeparametre for gytjen

	$\gamma/\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c_{u,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c'_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'_{tr,k}$ [grader]
Gytje, Pg ( $\sigma'_1 < \sigma'_{pc}$ )	13/3	12	0	33
Gytje, Pg ( $\sigma'_1 > \sigma'_{pc}$ )	13/3	$0,48\sigma'_1$	3	33

Tabel 2. Deformationsparametre for gytjen

	w [%]	Q [%]	Q <sub>s</sub> [%]	K [MN/m <sup>2</sup> ]	k <sub>x</sub> [m/sek]	c <sub>k</sub> [m <sup>2</sup> /sek]
Gytje, Pg ( $\sigma'_1 < \sigma'_{pc}$ )	130 – 180	-	2,8	0,5	$1 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-8}$
Gytje, Pg ( $\sigma'_1 > \sigma'_{pc}$ )	130 - 180	26	2,8	-	$1 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-8}$

### 3 LØSNINGSMETODER

Etableringen af vejforlægningen over blødbundsområdet kan ske på følgende måder:

- Total udskiftning
- Delvis udskiftning med letklinker
- Pælefundering/pæledæk
- Forbelastning

For det aktuelle projekt blev det valgt at anvende forbelastning, idet denne løsning vurderes at være den billigste løsningen, når der som i dette tilfælde er tilstrækkeligt tid til rådighed (20 mdr.).

Princippet ved forbelastning er at fremskynde de sætninger, som den fremtidige vejkonstruktion vil resultere i. Sætningerne fremskyndes ved at påføre den bløde bund en belastning, som er væsentligt større end den endelige belastning.

Når de ønskede sætninger er nået, fjernes forbelastningen og de fremtidige sætninger vil derefter overvejende være reduceret til bidraget fra krybninger alene.

### 4 SÆTNINGER

Nedenstående er anvendt ved beregning af konsoliderings- og krybningssætningerne:

$$\delta_{\text{total}} = \delta_{\text{kons}} + \delta_{\text{kryb}} \quad (1)$$

Konsolideringssætningen,  $\delta_{\text{kons}}$  er spændingsafhængig og beregnes ved:

For  $\sigma'_f < \sigma'_{pc}$  og  $\sigma'_f + \Delta\sigma'_1 > \sigma'_{pc}$ :

$$\delta_{\text{kons}} = \varepsilon \cdot H = \frac{\sigma'_{pc} - \sigma'_f}{K} \cdot H + Q \cdot \log((\sigma'_f + \Delta\sigma'_1) / \sigma'_{pc}) \cdot H \quad (2)$$

og for  $\sigma'_f = \sigma'_{pc}$ :



$$\delta_{\text{kons}} = \varepsilon \cdot H = Q \cdot \log ((\sigma'_f + \Delta\sigma'_1) / \sigma'_f) \cdot H \quad (3)$$

$\varepsilon$  konsolideringstøjningen  
 $H$  lagtykkelsen  
 $Q$  dekadehældningen  
 $\Delta\sigma'_1$  spændingstilvæksten  
 $\sigma'_f$  spændingen før belastningen  
 $\sigma'_{pc}$  forbelastningsspændingen  
 $K$  konsolideringsmodulet for genbelastningen

Krybningssætningen,  $\delta_{\text{kryb}}$ , er tidsafhængig og beregnes ved:

$$\delta_{\text{kryb}} = \varepsilon_{cr} \cdot H = Q_s \cdot \log (1 + (t/t_{sc})) \cdot H \quad (4)$$

$\varepsilon_{cr}$  krybningstøjningen  
 $H$  lagtykkelsen  
 $Q_s$  krybningsdekadehældningen  
 $t$  tiden, hvor spændingen er konstant  
 $t_{sc}$  tiden for oplastning til den nye spænding

Sætningsberegninger for hævnningen af terrænet 0,5 á 2,4 m for en konsolideringsgrad på 95% resulterede i konsolideringssætninger på 0,1 – 0,8 m.

Krybningssætningerne for de første 10 år af vejens levetid blev beregnet til 0,2 – 0,9 m, svarende til en totalsætning på 0,3 – 1,7 m.

Tidsforløbet for konsolideringssætningerne beregnes på grundlag af tidsfaktoren  $T$ :

$$T = ((k \cdot K) / \gamma_w \cdot H^2) \cdot t = (c_k / H^2) \cdot t \quad (5)$$

$k$  permeabiliteten  
 $K$  konsolideringsmodulet  
 $\gamma_w$  vands rumvægt  
 $H$  drænvejens længde  
 $t$  konsolideringstiden  
 $c_k$  konsolideringskoefficienten

Af formel (5) fremgår det, at konsolideringstiden er ligefrem proportional med drænvejen i 2. potens. En halvering af drænvejen vil således reducere sætningstiden til en fjerdedel.

Ved at etablere vertikal dræn ned gennem forbelastningen reduceres drænvejen. Den nødvendige afstand mellem vertikal drænene kan fastlægges ud fra den tidsperiode, der er til rådighed for forbelastningen.

Afstanden mellem vertikal drænene beregnes ud fra formel (6) og (7):

$$U = 1 - (1/e^k \cdot c_k) \quad (6)$$

$U$  konsolideringsgrad  
 $e$  eksponentialfunktion  
 $k$  beregnes af formel (7)  
 $c_k$  konsolideringskoefficient

$$k = \frac{8 \cdot t}{D^2 \left[ \frac{1}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \ln \frac{D}{d} - \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \left(\frac{d}{D}\right)^2 \right]} \quad (7)$$

t konsolideringstiden  
d diameter af vertikal dræn  
D diameter af jordlegeme, der drænes af vertikal drænet

For det aktuelle projekt er konsolideringstiden for et traditionelt sætningsforløb beregnet til 30 år. Dette sætningsforløb er reduceret til 20 måneder ved at etablere vertikal dræn med en indbyrdes afstand på 1,0 á 1,1 m.

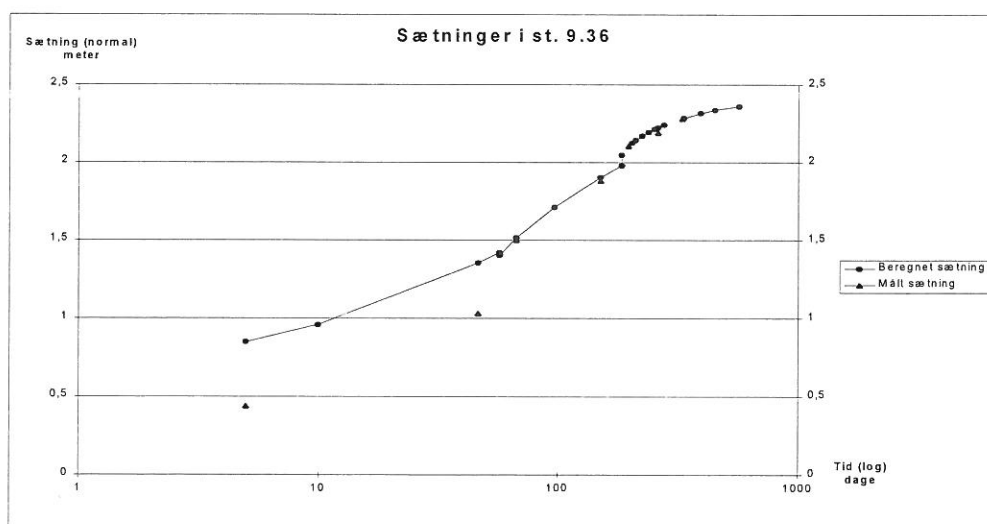
Vertikal drænene har naturligvis den største effekt ved tykke aflejringer af blød bund. Ved mindre lagtykkelser, hvor drænvejen i forvejen er lille, vil gevinsten ved vertikal dræn være noget mindre.

## 5 KONTROLMÅLINGER

For at kunne følge og kontrollere sætningsforløbet for forbelastningen er der under forbelastningsdæmningen installeret måleslanger på tværs af dæmningen til hydraulisk måling af sætningerne. Sætningsmålingerne foregår ved anvendelse af en elektrisk tryksonde, som trækkes gennem måleslangen med en wire. Sætningerne kan dermed registreres som relative niveauforskelle i måleslangene, som kan omsættes til sætninger i den bløde bund.

Da der ofte kun er en begrænset tidsperiode til rådighed for forbelastningen, er det nødvendigt at kunne fremskrive sætningerne, således at der kan handles i tide, hvis det viser sig nødvendigt med en yderligere belastning for at nå den ønskede sætning indenfor den afsatte tid.

Til det formål er edb-programmet PLAXIS anvendt. På grundlag af deformationsparametrene for jorden er der i PLAXIS opstillet beregninger for sætningerne. Ved at kalibrere disse beregninger med resultaterne fra slangemålingerne er sætningerne fremskrevet meget præcist. I nedenstående figur er de beregnede sætninger vist i forhold til de målte sætninger.



Figur 4. Målte og beregnede sætninger



Derudover kan der installeres piezometre ned gennem de bløde aflejringer til registrering af poreovertrykket. På grundlag af målingerne af poreovertrykket kan konsolideringsgraden til det konkrete tidspunkt beregnes, og dermed kan den resterende konsolideringstid fastlægges.

## 6 AFSLUTNING

Kalibreringen af de teoretiske beregnede sætninger med de målte sætninger viser, at vertikal drænene ikke kun reducerer dræntiden på grund af den reducerede drænvej, men også fordi drænretningen ændres. Ved at etablere vertikal drænene reduceres drænvejen i den aktuelle sag fra 6 m til 0,5 m. Derved ændres samtidig drænretningen fra at være lodret ved en traditionel konsolidering til at være vandret. Da dræntiden er ligefrem proportional med permeabiliteten og permeabiliteten i vandret retning,  $k_x$  er væsentlig større end i lodret retning,  $k_y$ , resulterer det i en kortere drænperiode og dermed en kortere sætningstid. For den aktuelle sag kunne permeabilitetsforholdet  $k_x/k_y$  beregnes til 30.

## 7 BYGHERRE

Bygherren på projektet er Århus Amt, Veje og Trafik, som forfatterne hermed gerne vil benytte lejligheden til at takke for godt samarbejde.

## 8 REFERENCER

Kremer R.H.J. & Visser G.T. 1980. Bulletin 80/1. *The construction of a tramline utilizing a light fill material, vertical mebra drains and a filter fabric*. Soil Mechanics Department, Public.

Geotechnics Holland BV. 1980. Bulletin 80/2. *Designing with the mebra-Drain system*.

## AGEP: Foundation Engineering papers

- 1 Sørensen, C.S., Steenfelt, J.S., Mortensen, J.K. (1995). Foundation for the East Bridge for the Storebælt Link. *Proc. 11th Eur. Conf. Soil Mech. & Fndn. Engng. Copenhagen*. Danish Geotechnical Society, Bulletin 11, Vol 5, pp 5.31-5.42. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9506.
- 2 Steenfelt, J.S., Hansen, H.K. (1995). Key Note Address: The Storebælt Link - a geotechnical view. *Proc. 11th Eur. Conf. Soil Mech. & Fndn. Engng. Copenhagen*. Danish Geotechnical Society, Bulletin 11, Vol 10, pp 10.11-10.40. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9509.
- 3 Feld, T., Sørensen, C.S. (1996). Structure-Foundation Interaction on the Storebælt Link East Bridge. *Proc. Int. Conf. for Bridge and Struct. Eng., Copenhagen*, pp 809-818. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9601.
- 4 Sørensen, C.S., Jensen B.S. (1996). Fod-pælens bæreevnetilvækst. *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-96, Reykjavik*, Vol 1, pp 253-258. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9606.
- 5 Sørensen, C.S., Faber, M.H., Stenstrup, B. (1997). Reliability Based Reassessment of an Existing Pile Foundation. *Proc. XIV Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., Hamburg*, Sept. 6-12 - 1997, pp 1197-1200. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9709.
- 6 Steenfelt, J.S. (1997). Type A prediction of settlements for railway box culvert in road embankment on clay till. *Proc. XIVth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg*, Vol 2, pp 1037-1044. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9710.
- 7 Sørensen, C.S., Steenfelt, J.S., Mortensen, J.K., Hansen, Aa., Gluwer, H. (1998). Foundation of the East Bridge. In *"East Bridge"*, published by A/S Storebæltsforbindelsen, pp 97-110, ISBN 87-89366-91-3. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9813.
- 8 Sørensen, C.S., Hededal, O. (1999). Geotechnical design considerations for Storebælt East Bridge and Øresund Bridge. *Proc. IABSE Colloquium, Foundation for Major Bridges-Design and Construction*, New Delhi, India, pp. 25-30 . *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9817.
- 9 Hededal, O., Sørensen, C.S. (1999). Elasto-plastic foundation analysis of ship collision to The Øresund High Bridge. *Proc. IABSE Colloquium, Foundation for Major Bridges-Design and Construction*, New Delhi, India, pp. 175-180. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9818.
- 10 Sørensen, C.S., Bisgaard, A., Hededal, O. (1999). Foundation of the Øresund Bridge. *Proc. XIIIth Eur. Conf. Soil Mech. Geotechn. Eng.*, 7- 10 June 1999, Vol. 1, pp. 609-616. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9819.
- 11 Steenfelt, J.S., Jørgensen, M.B., Jørgensen, P.O. (1999). Preloaded motorway embankments - an environmentally sound solution for soft soil areas. *Proc. XIIth Eur. Conf. Soil Mech. Geotechn. Eng.*, 7- 10 June 1999, Vol. 3, pp. 1583-1592. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9820.

## AGEP: Foundation Engineering papers

- 12 Feld, T., Petersen, S.J. (1999). Establishment of Foundation Design Parameters for Limestone. *Proc. IABSE Colloquium, Foundation for Major Bridges - Design and Construction*, New Delhi, India, 24-26 Feb. 99, pp. 51-56. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9901.
- 13 Feld, T. (1999). Development of the load-deformation curve for bridge piers subjected to ship impact. Published in *Proc. XIIth Eur. Conf. Soil Mech. Geotechn. Eng.*, 7- 10 June 1999, Vol. 1, pp. 737-742. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9902.
- 14 Rasmussen, J.L., Feld, T. (1999). Pile Driving Fatigue Damage. A Case Story. Published in *Proc. XIIth Eur. Conf. Soil Mech. Geotechn. Eng.*, 7- 10 June 1999, Vol. 2, pp. 577-582. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9903.
- 15 Feld, T., Rasmussen, J.L., Sørensen, P.H. (1999). Structural and Economic Optimization of Offshore Wind Turbine Support Structure and Foundation. Published in *Proc. OMAE-99, 18th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, St.Johns Nfld. Canada July 99. Vol ?, pp. ? *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9904.
- 16 Sørensen, C.S., Jensen, B.S. (2000). Skråningsstabilitet. Accepted for publication in *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-2000*, Helsinki, June 5.-7.2000. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R2004.
- 17 Jensen, B.S., Sørensen, C.S. (2000). Effektivisering af forbelastning ved anvendelse af vertikaldræn. Accepted for publication in *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-2000*, Helsinki, June 5.-7.2000. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R2005.
- 18 Feld, T., Leth, C.T., Mikkelsen, H., Steenfelt, J.S. (2000). Nyt laboratorieudstyr til simulering af dynamisk påvirkede sugebøttefundamenter. Accepted for publication in *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-2000*, Helsinki, June 5.-7.2000. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R2006.